

위터젯 보조면판이 장착된 마이크로터널링 머신의 장애물 돌파 성능에 관한 연구

김정근, 박태동
KT기술연구소 네트워크인프라연구팀

A study on the driving performance of the microtunneling machine with a rotating water jet cutterhead

Jung-Guen KIM, Tae-Dong Park

Network Infra Research Team, KT Technology Research Laboratory

Abstract - 도심의 편리한 생활을 위해 초고속 데이터 통신, 상하수도, 가스등의 원할 한 공급이 요구되고 있으며 이러한 인프라 시설들은 지하터널을 통하여 공급이 되게 된다. 도심지의 교통혼잡과 소음, 진동으로 인한 사회비용의 증가와 민원으로 사실상 개착식 공법은 적용되기 어려운 실정에 있다. 특히 앞에 열거한 인프라 시설들은 2m이하의 중소형 크기로 마이크로터널링 공법이 널리 사용되고 있으며 최근에는 현실적인 현장의 요구와 공사비용의 절감을 위해 1m이하의 소형터널에 대한 요구가 늘어 나고 있으나 마이크로터널링 머신의 소형화에 따른 절삭력의 감소와 지하 장애물에 대한 대처가 어려워짐으로 이에 대한 해결책이 요구되고 있다. 이를 위해 위터젯이 장착된 마이크로터널링 머신이 소개된바 있지만 면판에 단순고정된 형태라 절삭면적 및 효율에 한계가 있다. 본 연구는 절삭면적의 확대 및 효율의 증가를 위해 공전하는 면판에 자전하는 위터젯 보조면판을 제안하였으며 위터젯에 가장 적합한 커터종류를 찾기 위해 절삭력을 고려한 성능계수를 제안하였다.

1. 서 론

마이크로터널링 공법은 도로 개착없이 통신터널, 하수관, 가스관등의 지하시설을 구축할 수 있는 방법이다. 이 공법에 사용되는 마이크로터널링 머신은 커터헤드(Cutter head), 전동부(Front body) 그리고 후동부(Rear Body)로 구성되어 있으며[그림 1(a)] 커터헤드에 의해 파쇄된 압편, 자갈, 토사등이 배니파이프를 통해 배출되며 송배압 차의 조절로 막장을 지지하게 된다[그림 1(b)]. 또한 방향수정잭(Steerig jack)을 사용하여 곡선터널시공도 가능하다. 최근 기존의 개착식 공법으로 인한 사회적 비용을 수발하는 문제를 최소화 하면서도 지하시설을 구축할 수 있는 마이크로터널링 공법이 적극적으로 사용되고 있는 추세다.

특히 사람의 신장보다 작은 중소구경 터널의 효율성과 경제적인 면에서 더 많은 수요를 발생하고 있다. 그러나 시공하는 터널의 크기가 작아지면서 중소형 굴진기의 내부공간이 작아져 장비 개발 측면에서는 어려운 문제들이 발생한다. 특히 실장 할 수 있는 면판 구동모터의 용량의 한계는 처리 할 수 있는 장애물에도 한계를 가지게 되며 대구경 장비의 경우에는 막장에 접근할 수 있는 작업공간을 통하여 작업자에 의한 각종 조치를 취할 수 있는 반면 소구경 장비는 심각한 장애 발생시 장비를 지상으로 꺼내야 하는 극단적인 조치가 필요하다. 따라서 소구경 장비를 이용한 시공에 있어서 장애물 대처에 대한 다른 방법이 요구되고 있다.

2. 본 론

2.1 마이크로터널링머신의 위터젯 적용

앞서 설명한 소구경 마이크로터널링 머신의 한계를 극복하기 위해 위터젯을 이용한 장애물 대처기술이 시도되었다. 위터젯은 지하에서 만날 수 있는 취성의 장애물과 좀처럼 해결이 어려운 보강과일, 나무등을 효과적으로 제거할 수 있는 절삭특성을 갖고 있다. 지금까지는 위터젯을 면판의 특정위치에 단순 고정시켜왔는데[그림 2] 이 방식의 위터젯 궤적은 위터젯 노즐의 위치가 반지름이 되는 일정한 동심원만이 생기게 된다. 또한 동심원의 궤적은 롤러커터와 비트의 궤적과 평행하기 때문에 절삭방식이 중복되어 절삭효율이 떨어지게 된다.

본 연구에서는 단순 고정식의 한계를 극복하고 절삭효율을 높이기 위해 보조면판이 스스로 자전 하면서 주면판에 대해 공전을 함께하는 위터젯 보조면판을 제안하고자 한다[그림 3]. 제안한 보조면판은 고정된 궤적 방식이 아닌 중첩된 방사형 궤적으로 더 넓은 범위를 절삭할 수 있다.

제안된 보조면판의 구현을 위해서는 두 가지 기술적인 과제를 해결해야 한다. 하나는 적절한 속도분포로 균일하고 조밀한 격자가 생성될 수 있는 주면판과 보조면판 사이에 최적의 회전비율을 결정하는 것이고 또 다른 하나는 수 개의 위터젯 노즐을 장착하고 위터젯 배관을 고려하여 자전과 공전이 가능한 기구(Mechanism) 이다.

2.2 세 개의 위터젯 노즐의 거동 및 구현방법

주면판과 위터젯 보조면판의 적절한 회전비를 결정하기 위해서는 보조면판의 거동 모델이 필요하다.

2.2.1 위터젯 보조면판과 주면판의 거동방정식

위터젯 보조면판이 ω rad/sec의 속도로 회전하고 Ω rad/sec의 속도로 주면판이 회전한다고 했을 때 한 개 노즐의 위치는 식(1)과 같이 표현 할 수 있다. [그림 4]

$$\begin{aligned} x(t) &= L \cos(\Omega t) + P \cos(\omega t + \theta) \\ y(t) &= L \sin(\Omega t) + P \sin(\omega t + \theta) \end{aligned} \quad \text{식(1)}$$

그리고 한 개 노즐의 속도 $v(t)$ 는 식(1)의 시간 미분으로 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} v(t) &= \frac{dx}{dt} i + \frac{dy}{dt} j \\ &= \{-L\Omega \sin(\Omega t) - P\omega \sin(\omega t + \theta)\}i \\ &\quad + \{L\Omega \cos(\Omega t) + P\omega \cos(\omega t + \theta)\}j \end{aligned} \quad \text{식(2)}$$

따라서 한 개의 노즐의 선속도 $|v(t)|$ 는 식(3)으로 표현 할 수 있다.

$$|v(t)| = \sqrt{P^2\omega^2 + L^2\Omega^2 + 2LP\omega\Omega \cos(\theta + \omega t - \Omega t)} \quad \text{식(3)}$$

ω 와 Ω 사이의 관계가 감속기어비 m 으로 $\omega = m\Omega$ 같이 표현된다면 노즐의 거동[식(1)]과 선속도[식(2)]는 주면판의 회전속도로 표현 할 수 있다[식(4), 식(5)].

$$x(t) = L \cos(\Omega t) + P \cos(m\Omega t + \theta)$$

$$y(t) = L \sin(\Omega t) + P \sin(m\Omega t + \theta) \quad \text{식(4)}$$

$$|v(t)| = \Omega \sqrt{(P^2 m^2 + L^2) + 2LPm \cos(\theta + (m-1)\Omega t)} \quad \text{식(5)}$$

2.2.2 궤적 해석

세 개의 워터젯 노즐이 동일한 간격으로 배치 되어 있을 때 세 개의 방사 궤적이 생성된다. 적절한 기어비를 사용하면 조밀한 격자의 방사형의 궤적이 생성되게 된다. 표1의 기어비에 따라 생성되는 세 노즐의 중첩된 궤적을 해석하여 그림5에 나타내었다. 음(-)의 부호는 주면판과 보조면판의 회전방향이 반대임을 의미한다.

해석 되어진 궤적의 형상을 통하여 기어비 m 이 -1.6과 -0.6을 이용한 궤적이 조밀하여 1차 절삭에 적합한 형상임을 보여준다. 그리고 궤적이 반경 방향으로 뻗어있기 때문에 롤러커터나 비트커터의 방향과 직각에 가깝게 되어 2차 파쇄 효과를 높일 수 있다.

2.2.3 회전하는 워터젯 보조면판의 구동방식

자전과 공전을 동시에 하는 워터젯 노즐에 고압의 물과 연마재를 공급하면서 배관의 꼬임을 방지하기 위해 중심축에 배관을 설치하고 스윙블 조인트를 사용하여 회전이 자유로우면서 고압수와 연마재 공급이 가능한 구조를 제안하였다. 그림 6에 워터젯 보조면판과 배관을 나타내었다. 주면판과 보조면판의 감속기어는 워터젯 모듈안에 장착하였고 삼차원 솔리드 모델러를 이용하여 협소한 공간에 실장 되는 부품의 간섭을 체크하고 배관을 설계하였다.

2.3 성능실험

굴진속도(분당 굴진거리)는 마이크로터널링 머신의 성능 나타내는 대표적이고도 중요한 수치이다. 그리고 절삭력(절삭토크)은 소구경 굴진기의 성능의 상한을 나타내는 중요한 수치가 된다. 회전하는 워터젯 보조면판을 장착한 마이크로터널링 장비의 성능을 확인하고 워터젯 보조면판의 2차 절삭에 적합한 면판 조합을 찾기 위한 실험을 수행하였다.

2.3.1 실험장치

실험장치는 세 개의 워터젯 노즐을 갖는 보조면판을 장착한 실제 크기(외경 $\Phi 1,230\text{mm}$)의 마이크로터널링 머신 전동부와 유압추진대, 각종 센서들과 제어 패널로 구성되어 있다. 실험에 사용된 굴진기의 크기는 내경 1,000mm 크기의 지하터널 시공에 사용되는 것이다. 실험장치의 상세한 사양과 용도를 표 2에 나타내었다. 그리고 실험에 사용된 암반 시편은 거창 화강암을 사용하였으며 일축 압축강도는 1,214 kgf/cm² 이다.

2.3.2 실험조건

두 경우의 추력과 면판 조합을 사용하여 표3의 다섯 가지 실험을 수행 하였다. "30"과 "40"은 tonf 단위의 추진력을 나타내며 "RC"는 롤러커터를, "WB"는 워터젯-비트 조합을, 그리고 "WR"은 워터젯-롤러커터를 나타낸다.

2.3.3 실험결과

2.3.3.1 절삭된 암반표면

그림9(a)는 일반적으로 암반굴진에 사용되는 롤러커터에 의해 절삭된 암반 표면이고 그림9(b)는 워터젯 보조면판만을 사용하여 방사성으로 잘삭된 암반표면이다. 그림9(c)와 그림9(d)는 각각 워터젯-비트, 워터젯-롤러커터 조합으로 절삭된 암반표면이다.

2.3.3.2 굴진속도 비교

일반적으로 마이크로터널링 머신의 성능은 굴진속도로 표현된다. 추력을 30tonf로 일정하게 유지하고 시간에 대한 위치를 그림10에 표현하였고 직선 보간하여 그 기울기로 평균 굴진속도를 구하였다.

그림10은 롤러커터(30RC)만으로 굴진했을 때 보다 워터젯 보조면판을 장착하여(30WR, 30WB) 굴진한 결과가 79%, 101% 가량 향상됐음을 알 수 있다.

추력을 40tonf로 유지하고 워터젯 보조면판을 사용하여 굴진했을 때(40WR, 40WB), 추력 30tonf 굴진속도(30WR, 30WB)에 비해 119%, 49% 향상되었다.(그림 11)

2.4 굴진성능과 면판조합별 토크

그림 12에 나타난 추력에 대한 굴진속도 양상을 보면 추력 30tonf의 굴진속도 증가 경향이 40tonf의 경향과 다른 것을 확인 할 수 있다. 즉, 30tonf에서 30WR이 가장 빠른 굴진속도를 나타낸 반면 40tonf에서는 40WB가 가장 빠른 것으로 나타났으나 40WB의 굴진속도의 증가는 토크의 급격한 증가에 의한 결과이며 중 소형 굴진기가 내부공간 협소로 토크용량에 제한이 있기 때문에 굴진속도만으로 중 소형 굴진기의 성능과 커터헤드 조합의 성능을 평가 할 수는 없다.

롤러커터로 작업시 발생한 토크는 회전하는 커터의 조임울과 표면의 수직항력으로 발생하는 마찰력으로 발생한 것으로 Log증가 하게 된다. 즉, 추력의 증가량에 비해 토크의 증가량은 점차 감소하게 된다.(그림 13)

그러나 이에 비해 비트가 암반표면에 접촉하여 발생하는 마찰력으로 발생한 토크는 절입 되어지는 깊이와 추력으로 인해 지수 증가하는 경향을 보인다. 그림 13과 같이 모터의 용량 한계에 대해서 비트, 롤러커터가 사용 할 수 있는 추력은 각각 F1, F2이다. 본 연구 대상인 중 소형 굴진기는 공간제약을 가지고 있기 때문에 장착 가능한 모터의 용량은 제한적이며 이에 따라 사용할 수 있는 추력의 한계도 가지게 된다. 상술한 경향은 롤러커터가 더 넓은 추력범위를 가지게 되고 추력이 굴진속도에 민감한 영향을 받는 굴진기 특성상 더욱 적합한 커터헤드가 될수 있음을 암시한다. 굴진기 커터헤드 조합 선택시 정성적으로나마 모터의 토크, 추력, 굴진속도가 함께 고려되어 비교 판단할 만한 성능계수가 필요하다. 본 실험에서는 토크와 추력, 굴진속도를 고려한 무차원 값

을 성능계수[식 6]로 제안한다.

$$P = \frac{Fv}{T\dot{\theta}} \quad \text{식(6)}$$

- P 성능계수
- F 추진력 (tonf)
- v 굴진속도 (m/min)
- T 절삭토크 (tonf-m)
- $\dot{\theta}$ 회전속도 (RPM)

분자항은 굴진출력으로 추력과 굴진속도에 비례하며 분모항은 절삭출력을 의미하여 토크와 면판 회전속도에 반비례한다. 면판의 절삭기구가 추력과 토크 간의 관계에 영향을 미치게 되고 결과적으로 굴진속도가 증가하더라도 토크가 지수적으로 증가하게 되면 전체적인 성능의 향상정도가 작게 나타나게 된다. 식 6을 사용하여 각 실험 조건에 따른 굴진성능계수를 그림 14에 나타내었다.

토크를 고려한 굴진 성능면에서 그림 14에 표현된 순으로 성능에 차이가 있음을 알 수 있다. 굴진속도 비교와는 달리 40WR이 40WB보다 우수한 성능을 가지고 있음을 나타내었다. 값에 비례하여 성능에도 동일한 차이가 남을 의미하지 않지만 롤러커터가 비트보다 사용할 수 있는 토크의 여유로 잠재되어 있는 성능이 우수함을 나타내고 있다.

3. 결 론

마이크로터널링 머신의 장애물 대처를 위한 방법의 일환으로 자전과 공전을 함께 하는 워터젯 보조면판을 제안하였으며 궤적과 선형속도 분포해석을 통해 절삭면적을 최대화 하면서 효율적인 1차파쇄가 가능하도록 주면판과 보조면판 사이의 최적 기어비를 결정하였다. 그리고 워터젯 보조면판의 1차절삭에 이어 효과적인 2차파쇄가 가능한 면판조합을 결정하기 위해 토크와 굴진속도를 함께 고려한 무차원 성능계수를 제안하였다. 성능실험을 통해 워터젯 보조면판을 장착한 경우에 최고 200%까지 굴진속도가 향상됨을 확인하였다. 성능실험에 사용된 암반뿐만 아니라 더 나아가 취성의 지하 장애물(옥석, 지반보강 파일)의 대처에도 효과적인 것으로 기대한다. 이것은 굴진속도의 향상뿐만 아니라 굴진의 불가능한 상황을 해결할 수 있는 효과적인 해결책이 될 수 있음을 의미한다.

비트는 일반 암반파쇄용으로 사용되지는 않지만 워터젯에 의해 절삭된 요철을 파쇄하는 용도로 사용할 수 있는 가능성을 보였으나 토크용량에 제한이 있는 중소형 굴진기에 적용되하게 될 때 토크한계로 여유추력을 사용하지 못하는 경우가 발생할 수 있기 때문에 워터젯-롤러커터의 조합이 중소형 굴진기의 장애물 돌파시에 적합함을 확인 할 수 있었다.

(참 고 문 헌)

[1] Ryo Sugiura, 2000, "Experimental Study of Tunnel Excavation Using Water Jet Technology", 6th Pacific Rim International Conference on Water Jetting Technology, pp. 132-135.
 [2] Tae-dong Park, Jang-Hyun Nam, 2001, "Trenchless Technologies in Korea", 19th International No-Dig Conference

[3] Jang-Hyun Nam, Tae-Dong Park, 2002, "Tunneling Management System for Microtunneling Machines", 5th International Conference of the Australasian Society for Trenchless Technology

-그림-

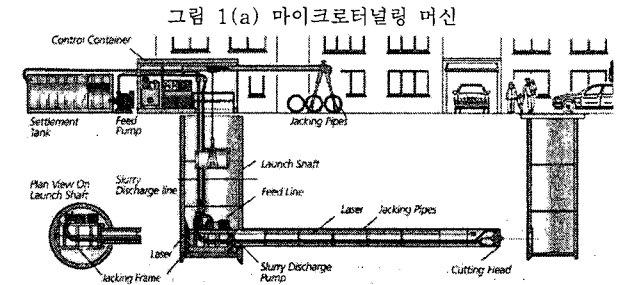
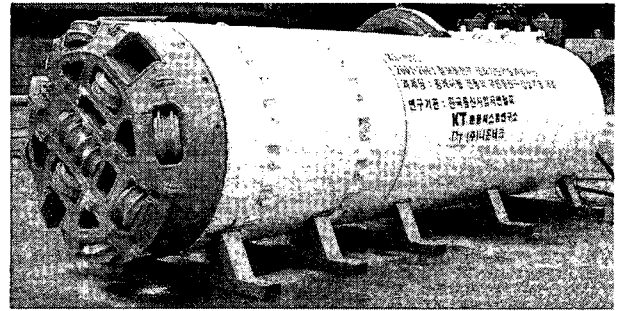


그림 1(a) 마이크로터널링 머신

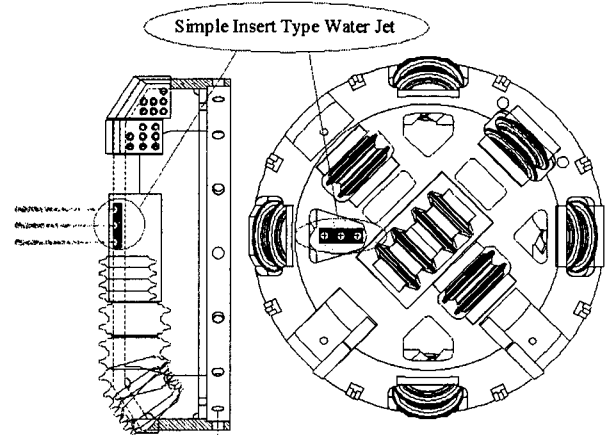


그림 2 단순 고정식 워터젯

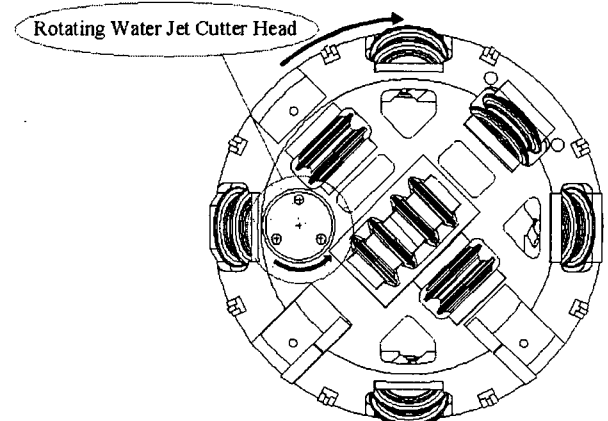


그림 3 회전한 워터젯 보조면판

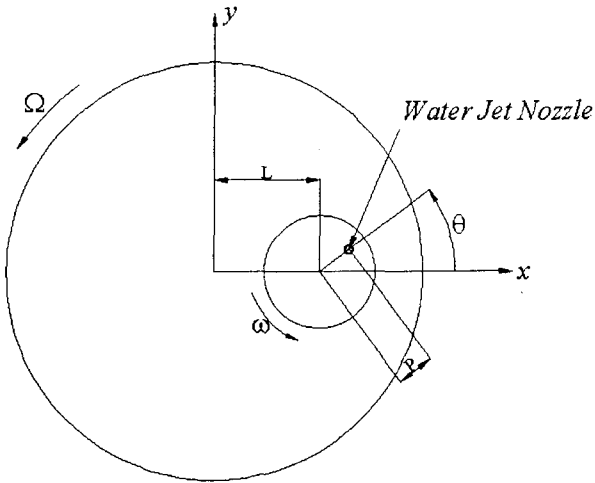


그림 4 자전과 공전을 하는 워터젯 노즐의 거동

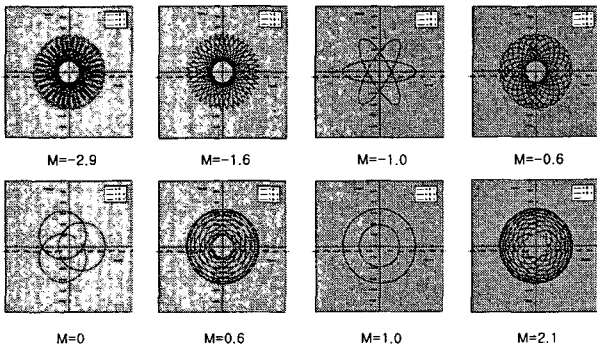


그림 5 감속비에 따른 궤적

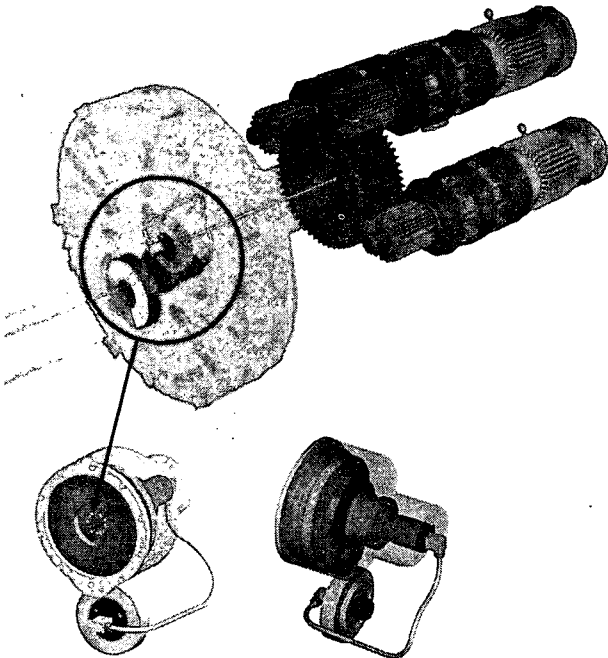


그림 6 워터젯 배관 및 워터젯 모듈

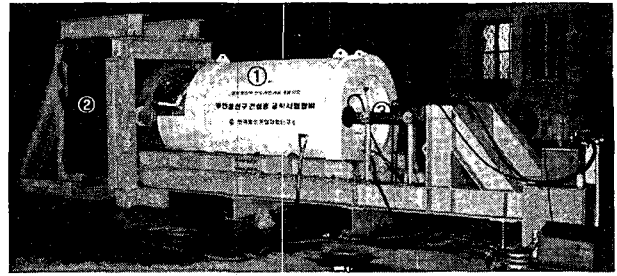


그림 7(a) 실험장치



그림 7(b) 보조면판을 장착한 굴진기 정면

- ① 마이크로터널링 머신 전동부
- ② 화강암 시편
- ③ 유압 추진잭
- ④ 워터젯 보조면판

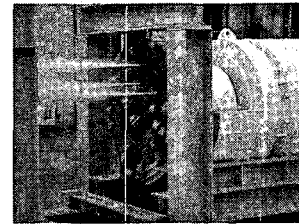
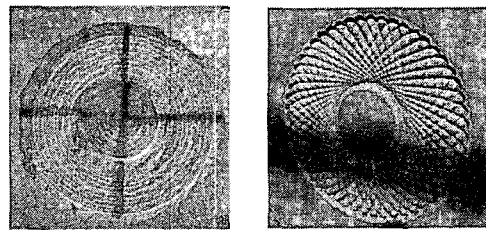
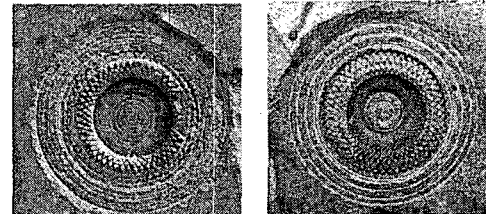


그림 8 워터젯시험분사



(a) 롤러커터

(b) 워터젯



(c) 워터제-비트

(d) 워터젯-롤러커터

그림 9 네 가지 방법으로 절삭된 암반표면

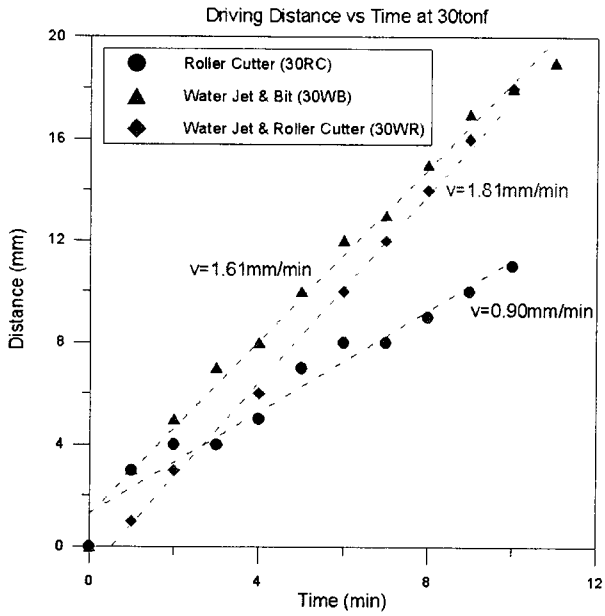


그림 10 30tonf 추력시 시간당 추진거리
Driving Distance vs Time at 40tonf

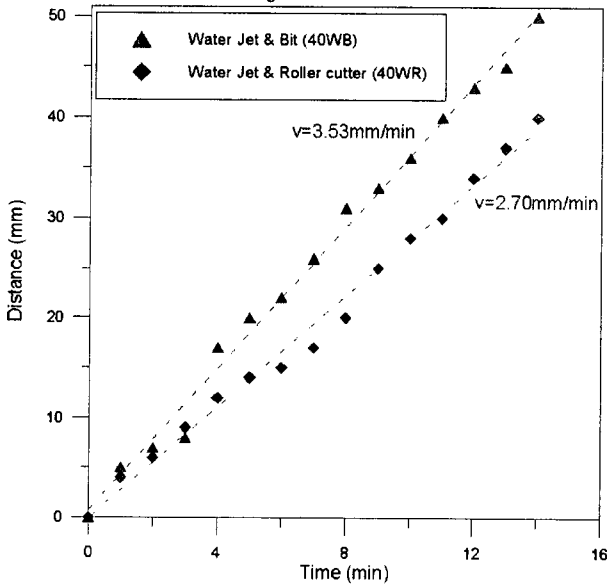


그림 11 40tonf 추력시 시간당 굴진거리

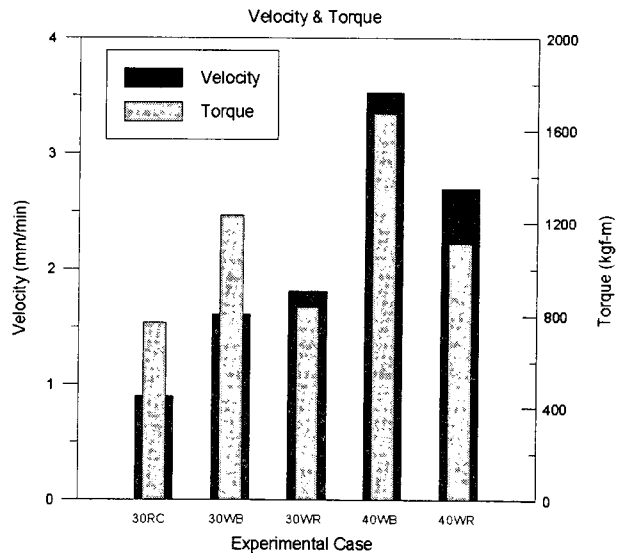


그림 12 굴진속도와 절삭토크

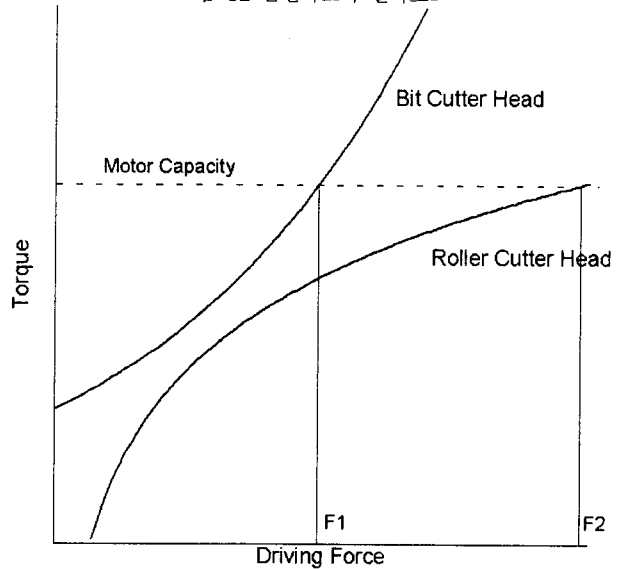


그림 13 절삭방식에 따른 절삭기구의 차이
Driving Performance

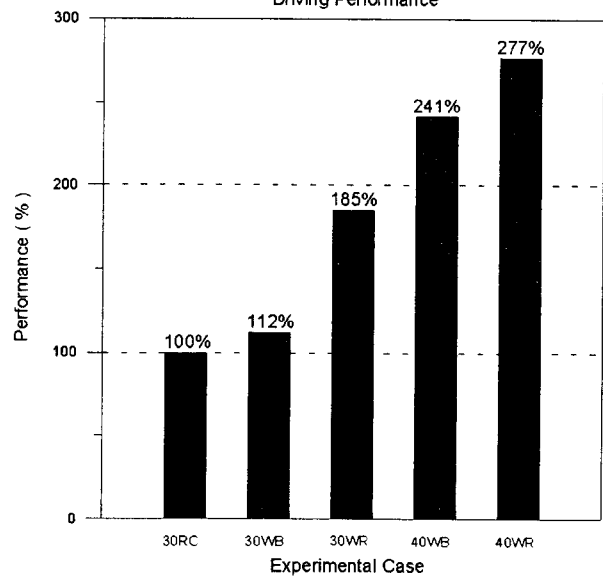


Fig. 14. Driving performance

- 표 -

표 1 궤적 해석 조건

M	-2.9	-2.1	-1.6	-1.2	-1.0	-0.6	0	0.6	1.0	1.6	2.1	2.9
Condition $Q=3\text{rpm}$ $L=220\text{mm}$ $P_1=P_2=P_3=120\text{mm}$ $\theta_1=0^\circ$ $\theta_2=120^\circ$ $\theta_3=240^\circ$												

표 2 실험장치 구성 및 사양

Experimental Set	Specification and Purpose
Front Body	$\phi 1,230\text{mm}$
Jacking Cylinder	60tonf (30tonf \times 2ea)
Jacking Station	To fix granite specimen with high tensile bolt and H-Beam
Control Panel	To control the experimental set
Load Cell	To measure jacking force
Hook Meter	To measure motor current (to get cutting torque)
Water Jet	2-Phase abrasive suspension water jet with maximum pressure of 680bar

표 3 실험조건

Experimental Condition	Jacking Force(tonf)	Experimental Condition		
		Water Jet	Bit Cutter	Roller Cutter
30RC		X	X	O
30WB	30	O	O	X
30WR		O	X	O
40WB	40	O	O	X
40WR		O	X	O